

EIGENVERBRAUCHSSTEIGERUNG IN HAUSHALTEN DURCH DEMAND-SIDE-MANAGEMENT

Christoph MAIER*¹, Christoph Groß*¹, Markus Litzlbauer¹, Andreas Schuster¹,
Franz Zeilinger¹

¹ Technische Universität Wien, Institut für Energiesysteme und Elektrische Antriebe
Gußhausstraße 25/370-1, 1040 Wien, Austria
Tel.: +43 | (0)1 | 58801 | 370142, Fax: +43 | (0)1 | 58801 | 9370142
E-Mail: christoph.maier@tuwien.ac.at
Web: www.ea.tuwien.ac.at

Kurzfassung: Im Rahmen des Projekts „aDSM - Aktives Demand-Side-Management durch Einspeiseprognose“ werden hierarchisch skalierbare Systeme mit dezentraler Intelligenz entwickelt, welche den Haushalts- sowie den zukünftigen Elektrofahrzeugverbrauch möglichst flexibel an die lokal erzeugte, erneuerbare, elektrische Photovoltaik (PV) - Einspeisung anpassen. Die Lastverschiebungen bzw. gesteuerten Ladevorgänge werden aktiv und vorausschauend durchgeführt. Im Fokus in diesem Paper sind hierbei die Demand-Side-Management (DSM) Potenziale im Haushaltsbereich.

Es wird ein lokales DSM Modell vorgestellt, das den Verbrauch von Haushalten möglichst effektiv und flexibel an seine PV-Erzeugung anpasst. Als Datengrundlage dient eine im Projekt „aDSM“ entworfene Modellsiedlung, welche möglichst exakt die österreichischen Wohnverhältnisse auf der Niederspannungsebene abbildet. Darüber hinaus wird eine lineare Optimierung durchgeführt, die unter Berücksichtigung von perfekter PV- und Lastprognose als theoretische Obergrenze für den Regelalgorithmus dient. Die Zielfunktion ist die Maximierung des Eigenverbrauchs der Haushalte.

Die Ergebnisse zeigen, dass der lokale DSM-Ansatz den Eigenverbrauch und die Autarkie der Einzelhaushalte steigert und dadurch die effektiven Haushaltsstromkosten im Durchschnitt sinken. Die entscheidenden Einflussfaktoren sind die Anlagendimensionierung und das Vorhandensein von Elektrofahrzeugen. Weitere Untersuchungen zeigen, dass die zusätzliche Steuerung von Verbrauchern der Kategorie „waschen“ und „beleuchten“ und die Berücksichtigung einer PV-Prognose darüber hinaus im Mittel wenig Kosteneffizienzsteigerung bringen.

Keywords: Demand-Side-Management, Eigenverbrauchsanteil, Autarkiegrad

1 Einleitung

Demand-Side-Management (DSM) wird häufig mit den Zielsetzungen der Lastgangglättung sowie der Spitzenlastverringern verbunden. Das Projekt aDSM hat sich zum Ziel gesetzt, mit DSM einen möglichst flexiblen elektrischen Lastgang zu erreichen, welcher sich an die gegebene volatile elektrische Einspeisung regenerativer Erzeuger anpasst.

Als Ausgangssituation dient eine Modellsiedlung mit hohem regenerativen Erzeugungsanteil [1], die die österreichischen Gebäude- und Wohnverhältnisse in Österreich möglichst exakt auf einen Niederspannungsabschnitt abbildet. Die Einwohnerzahl wurde dabei mit 300

festgesetzt, wobei sich diese auf 126 Haushalte in 60 Gebäuden verteilen. Die DSM-Potenziale dieser Siedlung werden neben dem Haushaltssektor vor allem im Bereich der Elektromobilität gesucht.

In dieser Arbeit liegt die Zielsetzung in der Beschreibung eines Regelalgorithmus, der die verfügbaren DSM-Potenziale möglichst effektiv nutzt. Die im Folgenden beschriebenen Ansätze verfolgen somit das Ziel, die DSM-Potenziale für lokale Zwecke (z.B. Eigenverbrauchsmaximierung) auf der Ebene eines einzelnen Haushalts bestmöglich einzusetzen.

2 Datengrundlage

2.1 Geräteausstattung

Die Geräteausstattung und Gerätenutzung der Modellsiedlung entsprechen jenen von [1] und stehen für jeden Haushalt zur Verfügung. Daraus abgeleitet wurden elektrische Verbrauchsprofile der einzelnen Geräte über ein vollständiges Jahr mit einer Auflösung von einer Minute errechnet. Die Haushalts-Verbrauchsprofile weisen die elektrischen Leistungsaufnahmen der einzelnen Geräte sowie das Nutzungsprofil auf (z.B. wann der Benutzer die Waschmaschine einschaltet). Die Geräte wurden grob in die Kategorien „thermisch“, „waschen“ und „beleuchten“ eingeteilt. Für die beiden erstgenannten wurde eine maximal zulässige Abschaltdauer bzw. Einschaltverzögerung [1] definiert. Innerhalb dieses Zeitraums, muss im gesteuerten Betrieb exakt die gleiche Energie aufgenommen werden, wie dies im Profil der unbeeinflussten Leistungsaufnahme vorgegeben ist.

2.2 Elektrofahrzeuge

Für die Elektrofahrzeuge stehen folgende Profile über ein Jahr im 1-min Zeitraster zur Verfügung:

- Wegstrecke [km]
- Spezifischer Verbrauch [kWh/km]
- Ungesteuertes Ladeprofil [kW]

Sie basieren auf der Mobilitätserhebung „Mobilität in Deutschland 2008“. Die zurückgelegte Wegstrecke im Minutenraster ergibt mit dem spezifischen Verbrauch das elektrische Verbrauchsprofil des Fahrzeuges. Dies entspricht genau der Änderungsrate des Ladezustandes (SoC) des Elektrofahrzeuges während der Fahrt. Das ungesteuerte elektrische Ladeprofil multipliziert mit dem Ladewirkungsgrad, beschreibt die Änderungsrate des Speichers während des Ladevorgangs.

Für die Penetration der Elektrofahrzeuge werden die Durchdringungsraten bzw. Fahrzeugklassen (BEV: rein elektrisches, batteriebetriebenes Fahrzeug; PHEV: Plug-In Hybrid Fahrzeug) der Studie ELEKTRA [2] (Szenario „Policy + High Price“) herangezogen (siehe Tabelle 1).

Tabelle 1: Durchdringungsszenarien und Fahrzeugklassen

	BEV 16 kWh	BEV 24 kWh	BEV 48 kWh	PHEV 16 kWh	EV ges.
gering	0,2 %	0,2 %	0,1 %	1,0 %	1,4 %
hoch	19,2 %	7,3 %	5,8 %	8,3 %	40,6 %
sehr hoch	50,5 %	13,5 %	30,7 %	3,9 %	98,6 %

2.3 Erzeugungszeitreihen

Bei der Erstellung der Erzeugungsreihen wird ebenfalls der Ansatz verfolgt, dass die österreichischen Potenziale auf die Modellsiedlung mit 300 Einwohnern heruntergebrochen werden. Wie einleitend beschrieben, stellen im Projekt aDSM die dargebotsabhängigen Einspeiser im Niederspannungsnetz den Betrachtungsgegenstand dar. Da Windkraftanlagen typischerweise im Mittel- und Hochspannungsnetz angeschlossen sind, werden diese innerhalb der Modellsiedlung nicht modelliert. Es finden daher ausschließlich Photovoltaikanlagen Anwendung.

Im Rahmen des Projekts Super-4-Micro-Grid wurden die Potenziale der Photovoltaik-Erzeugung in Österreich erhoben [3]. Aufgrund der Dachflächen und der nutzbaren Freiflächen ergibt sich eine installierbare Leistung von knapp 33 GW in Österreich. Davon entfallen 21 GW auf gebäudeintegrierte Anlagen. Auf die 300 Einwohner der Modellsiedlung umgelegt ergeben sich mittels Top-Down Ansatzes somit 813 kW.

Im Folgenden wird der ermittelte Wert mit einem Bottom-Up Ansatz verifiziert. Ausgangspunkt hierfür ist die Gebäudezusammenstellung der Modellsiedlung, welche die Anzahl je Gebäudetyp in Österreich widerspiegelt. In Tabelle 2 ist in der obersten Zeile die Gebäudeverteilung der Siedlung dargestellt. Hier ist noch die Unterscheidung zwischen großen und kleinen Wohngebäuden mit Sitz eines landwirtschaftlichen Betriebes im angenommenen Verhältnis dargestellt. Für die räumliche Positionierung im elektrischen Netz wurde zusätzlich die Unterscheidung zwischen städtischem und ländlichem Gebiet getroffen. Aus der Erhebung [4] geht hervor, dass rund 45% der österreichischen Bevölkerung in Städten wohnen. Dieser Anteil wurde auf die 300 Einwohner der Modellsiedlung umgelegt.

Tabelle 2: Anzahl an Gebäude je Typ sowie die installierbaren Photovoltaikleistungen

	Landw.	Landw.	Ein- und Zweifamilienhäuser	Wohnhäuser		Summe
	Betrieb groß	Betrieb klein		3-10 HH	11+ HH	
Gebäude	2	6	45	5	2	60
Gebäude - Stadt	0	0	5	4	2	11
Gebäude - Land	2	6	40	1	0	49
PV Installation pro Geb.	43 kW	12 kW	12 kW	17 kW	28 kW	
PV Installation Summe	87 kW	69 kW	519 kW	83 kW	55 kW	813 kW

In der Arbeit [5] wird die mittlere nutzbare Dachfläche je Gebäude mit 83 m² für Wohngebäude und 315 m² für landwirtschaftliche Gebäude angegeben. In der Arbeit [6] wurde die mittlere Dachfläche für Wohnhäuser erhoben. Diese beträgt für Gebäude der Größe „3 bis 10 Haushalte“ rund 120 m². Für Wohnhäuser mit 11 oder mehr Haushalten wird von 200 m² nutzbarer Dachfläche im Durchschnitt ausgegangen.




Mit der gegebenen Anzahl an Gebäuden sowie den erhobenen Dachfläche wurde der mittlere Anlagenwirkungsgrad mit 13,8% angenommen, sodass das Top-Down- als auch das Bottom-

Up-Ergebnis mit 813 kW installierter Leistung exakt gleich sind. Entsprechend typischer Werte für Photovoltaikwirkungsgrade (siehe [7]) spiegelt der berechnete Wert von 13,8% einen realistischen mittleren Anlagenwirkungsgrad wider. Dementsprechend stimmen die beiden Ansätze zur Bestimmung der installierbaren Photovoltaikleistung an Gebäuden überein.

Die „aDSM-Modellsiedlung“ bildet ausschließlich die österreichischen Haushalte ab, welche im Niederspannungsnetz angeschlossen sind. Großverbraucher welche in höheren Netzebenen installiert werden, sind hier nicht berücksichtigt. Daher müsste für Freifeldanlagen ebenfalls zwischen den unterschiedlichen Netzebenen unterschieden werden. Es ist anzunehmen, dass diese Anlagen eher in der Mittelspannungsebene vorzufinden sind. In weiterer Folge wird daher im Ausgangsszenario von einer vollen Ausschöpfung des gebäudeintegrierten Potenzials ohne Berücksichtigung des Freiflächenpotenzials ausgegangen.

Tabelle 3 zeigt das Photovoltaik-Ausbauszenario mit Netzkenndaten. Neben der installierten Leistung sind der mittlere Verbrauch der Siedlung sowie die Nennleistung des Ortsnetztransformators zum Vergleich dargestellt. Aufgrund der räumlichen Ausdehnung einer Siedlung kann nicht von einer Verringerung der Einspeiseleistung durch Ausgleichseffekte ausgegangen werden. Daher ist mit Einspeisespitzen in der Höhe der installierten Leistung zu rechnen. Demgegenüber ist der mittlere Verbrauch der Siedlung um Größenordnungen geringer. Mit den hier angenommenen Einspeiseleistungen werden somit deutliche Überschüsse und Rückspeisungen in Richtung Mittelspannungsnetz entstehen. Bei der vollen Ausschöpfung der Photovoltaik-Potenziale müssen somit Maßnahmen getroffen werden, sodass die Nennleistung des Ortsnetztransformators nicht überschritten wird.

Tabelle 3: Photovoltaik-Ausbauszenario mit Netzkenndaten

Leistungen	aDSM – Siedlung	
Installierte Photovoltaikleistung - Sz. 100% BIPV	813 kW	
Verbrauch - mittlere Leistung	65 kW	
Transformator - Nennleistung	630 kVA	

3 Eigenverbrauchsanteil und Autarkiegrad

Zwei wesentliche Kenngrößen zur direkten Verwertung der lokalen Einspeisung (z.B. durch PV-Anlagen) sind der Eigenverbrauchsanteil und der Autarkiegrad.

Der Eigenverbrauchsanteil ist jener Anteil der erzeugten (Photovoltaik-)Einspeisung, der zeitgleich und direkt am betrachteten Netzknoten (Stromzähler im Haushalt) genutzt werden kann. Die direkt verbrauchte Einspeiseleistung $P_{EV}(t)$ berechnet sich aus der momentanen Einspeisung der Photovoltaikanlage $P_{PV}(t)$ und dem Verbrauch je Haushalt $P_{Last}(t)$:

$$P_{EV}(t) = \min[P_{PV}(t), P_{Last}(t)]$$

Entsprechend der Vorzeichenkonvention wird die Einspeisung der Photovoltaik negativ gezählt, der Verbrauch weist positive Werte auf.

Der Eigenverbrauchsanteil ev beschreibt nun jene direkt verbrauchte Photovoltaik-Erzeugung $E_{EV} = \sum_t^N P_{EV}(t)$ bezogen auf die Gesamterzeugung E_{PV} für den Betrachtungszeitraum:

$$ev = \frac{E_{EV}}{E_{PV}}$$

Neben dem Eigenverbrauchsanteil ev stellt der Autarkiegrad ag (Deckungsgrad, Leistungsautarkiegrad) eine weitere Bewertungsgröße der direkten Nutzung dezentraler Erzeugung dar. Es handelt sich hierbei um jenen Anteil des Gesamtstrombedarfs, welcher durch die dezentrale Einspeisung gedeckt wird. Der Autarkiegrad ag berechnet sich zu:

$$ag = \frac{E_{EV}}{E_{Last}}$$

Der Eigenverbrauchsanteil und der Autarkiegrad geben gemeinsam Auskunft über die Dimensionierung der Photovoltaikanlage in Bezug auf den Verbrauch:

$$\frac{ag}{ev} = \frac{\frac{E_{EV}}{E_{Last}}}{\frac{E_{EV}}{E_{PV}}} = \frac{E_{PV}}{E_{Last}}$$

Aufgrund dieses Zusammenhangs können Haushalte mit einer verhältnismäßig kleinen Photovoltaik-Anlage tendenziell einen hohen Eigenverbrauchsanteil dafür aber einen geringen Autarkiegrad erzielen. Für Haushalte mit einer verhältnismäßig großen PV-Anlage gilt die gegenteilige Aussage.

4 Lokaler DSM-Ansatz

Die Modellierung des lokalen aDSM Modells wird in MATLAB durchgeführt. Dabei wird auf das Programmierparadigma „Objektorientiertes Programmieren“ zurückgegriffen. Dieses ermöglicht eine übersichtliche Strukturierung und eine Verringerung der Komplexität und Redundanz. Die Folge ist eine einfachere Handhabung und Lesbarkeit des Codes und die Möglichkeit der Wiederverwendung für ähnliche Problemstellungen. Nachfolgend werden die entscheidenden Akteure genauer beschrieben.

4.1 Haushaltscontroller

Der Haushaltscontroller stellt die zentrale Steuereinheit im Haushalt dar. Er überwacht die Residuallast des Haushalts, die sich aus der Einspeisung der PV-Anlage und der Verbraucher ergibt. Seine Aufgabe besteht darin, die Residuallast für jede Minute zu minimieren, indem er z.B. durch Rundsteuersignale Verbraucher zu- oder wegschaltet. Damit soll gewährleistet werden, dass der Eigenverbrauch des Haushalts möglichst maximal ist. Bei positiver Residuallast (mehr Verbrauch als Erzeugung) wird somit versucht, ab der nächsten Minute Lasten auszuschalten und bei negativer einzuschalten. Dabei wird allen Verbrauchern einer bestimmten Kategorie (siehe nachfolgende Unterpunkte) das gleiche Steuersignal gesendet. Die Umsetzung der Kommunikation zwischen den Elementen wird im Projekt „aDSM“ dabei nicht untersucht. Es wird von einer funktionierenden Kommunikation ausgegangen. Um die Kommunikation gering zu halten, wird abhängig von der Vorgeschichte nur dann ein Befehl übermittelt, wenn eine Zustandsänderung gewünscht wird. Die Verbraucher speichern den empfangenen Befehl und reagieren nun abhängig von ihrem Typ und ihrem aktuellen Zustand entweder sofort oder verzögert darauf.

4.2 Haushaltsgeräte

Jeder Haushalt besitzt eine Vielzahl von Haushaltsgeräten unterschiedlichster Kategorien. In [1] wurden diese definiert und Regeln für den Einsatz von DSM festgelegt. Tabelle 4 zeigt die definierten DSM-Regeln für Haushaltsgeräte.

Tabelle 4: DSM-Regeln für Haushaltsverbraucher [1]

Kategorien	Variante "Basic"				Variante "Full"					
	elektro-thermisch				waschen			beleuchten		
Parameter	Heizung	Warmwasser	Kühlschränke	Gefrierschränke	Waschmaschine	Wäschetrockner	Geschirrspüler	Fernseher	Computer	Beleuchtung
Abschaltdauer [h]	18 h	11 h	2.5 h	6 h						
Verhältnis $P_{\text{mittel}} / P_{\text{Nenn}}$	0.25	0.083	0.25	0.25						
Einschaltverzögerung [h]					5 h	5 h	5 h			
Leistungsreduktion [%]								- 20%	- 30%	- 9%
Standby Reduktion	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein	ja	ja	nein

Die Lastbeeinflussungsvariante „Basic“ beinhaltet nur jene Gerätekategorien, die eine ausreichend große thermische Zeitkonstante haben, sodass der Nutzer in seinem Verhalten nicht beeinflusst wird. Die Variante „Full“ beschreibt das vollständige Potenzial im Haushalt.

Auf Basis dieser Eigenschaften und Benutzerinteraktionsmöglichkeiten werden die Haushaltsgeräte weiter zusammengefasst. Die Abbildung 1 zeigt die Zuordnung aller betrachteten Geräte zu den 4 Gerätekategorien „elektro-thermisch“, „waschen“, „beleuchten“ und „kein DSM“.

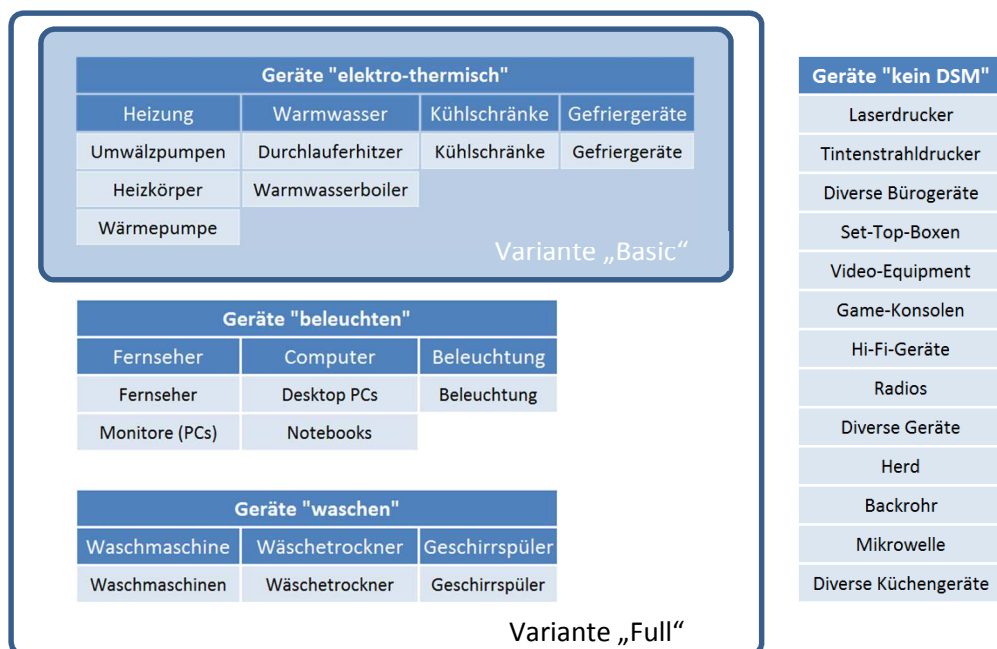


Abbildung 1: Zuordnung der Haushaltsgeräte zu den Gerätekategorien

Geräte „thermisch“ Die elektro-thermischen Verbraucher sind dadurch gekennzeichnet, dass die Anlagen bzw. Geräte bis zu einer gewissen Maximalzeit abgeschaltet werden dürfen. Die aufgenommene Energie muss jedoch innerhalb eines gewissen Zeitraums gleich dem ungesteuerten Lastprofil sein. Eine weitere Bedingung besteht darin, dass der Geräteeinsatz zeitlich nicht vorgezogen werden darf. Die Verbraucher werden so modelliert, dass sie eine Mindesteinschaltdauer aufweisen, um ein ständiges Ein- und Ausschalten zu vermeiden.

Geräte „waschen“ Die Geräte vom Typ waschen sind programmbasierend. Die elektrische Verbrauchskurve ist in ihrer Form somit nicht beeinflussbar. Es kann lediglich der Startzeitpunkt des Programms verschoben werden. Auch hier ist eine weitere Bedingung, dass der Geräteeinsatz zeitlich nicht vorgezogen werden darf.

Geräte „beleuchten“ Geräte vom Typ „beleuchten“ können in ihrer Wirkleistungsaufnahme beeinflusst werden. Eine zeitliche Verschiebung der Einsatzzeitpunkte ist hier nicht möglich. Falls das Gerät einen Standby-Verbrauch aufweist, kann dieser bei Bedarf abgeschaltet werden.

Geräte „noDSM“ Geräte vom Typ „noDSM“ können weder in ihrer Wirkleistungsaufnahme noch durch Verschiebung des Einsatzzeitpunktes beeinflusst werden.

4.3 Elektrofahrzeuge

Die Elektrofahrzeuge wurden analog zu den Haushaltsgeräten als steuerbare „Objekte“ in MATLAB modelliert. Jedoch wurden die DSM-Regeln (siehe Tabelle 5) so angepasst bzw. ausgelegt, dass je Szenario das Fahrzeug mit den meisten „nicht erfüllten Fahrten“¹ zumindest 95% aller Weg im Jahr elektrisch durchführen kann. Um dies einzuhalten werden die BEV nur dann für DSM herangezogen, wenn der aktuelle Ladezustand zumindest 50% entspricht. Für die max. 5% an „nicht erfüllte Fahrten“ sind alternative Verkehrsmittel (Rad, Bus, Bahn, etc.) oder ein konventionelles Fahrzeug zu wählen.

Tabelle 5: DSM-Regeln für die berücksichtigten Elektrofahrzeuge

Parameter	Kategorie	
	BEV / rein elektrisch	PHEV / Plug-In Hybrid
Änderungsstufen der Ladeleistung	nicht stetig variabel	nicht stetig variabel
Maximale Höhe der Leistungsänderung je Min.	5% der max. Ladeleistung	5% der max. Ladeleistung
DSM ab einem Batterie-ladezustand größer als	50%	keine Einschränkung
"Vehicle to Grid" (Netzurückspeisung)	nein	nein

Allgemein muss der Ladezustand der Elektrofahrzeugbatterien immer innerhalb der erlaubten SOC-Grenzen betrieben werden. Die nutzbare Batteriekapazität wurde bei den rein

¹ Eine Fahrt gilt als „nicht erfüllt“ wenn der zugehörige Ladezustand der Batterie unter den gegebenen Rahmenbedingungen nicht ausreicht um den ermittelten Energiebedarf der entsprechenden Fahrt zu decken.

elektrischen Fahrzeugen mit 80% und jene der Plug-In Hybride mit 60% der „verbauten“ Kapazität festgelegt.

Ist ein Elektrofahrzeuge am Netz angeschlossen und alle Rahmenbedingungen für DSM erfüllt, so versucht der Controller durch Anpassung der Ladeleistung die vorhandene HH-Residuallast zu minimieren und somit die PV-Erzeugung lokal und instantan zu verbrauchen. Bei Residuallasten nahe Null kommt es systembedingt zu einem alternierenden Vorzeichen der HH-Residuallast, da die Steuerung der HH-Geräte wie auch der Elektrofahrzeuge erst eine Minute verzögert greift. Dies verursacht jedoch ständige, sich abwechselnde, Starts und Stopps der Ladevorgänge. Um die Auswirkungen so gering als möglich zu halten und in der aDSM Siedlung den „beste“ Eigenverbrauchsanteil zu erreichen, werden die Ladeleistungsänderungen sprunghaft und in der Höhe variabel an die Größe der HH-Residuallast angepasst. Die Maximale Höhe der Leistungsänderung je Minute ist dabei mit 5% der maximalen Ladeleistung (3,5 respektive 10,5 kW) begrenzt.

Abbildung 2 zeigt den beschriebenen Zusammenhang für einen beispielhaften Tag und ein rein elektrisches Fahrzeug (BEV) mit 48 kWh Batteriekapazität. Man sieht deutlich die Verschiebung des Ladevorganges von den Nacht- zu den Tagesstunden, was in einer Verbesserung des PV-Eigenverbrauchsanteils resultiert. Weiters ist zu erkennen, dass das Elektrofahrzeug vor 17:30 Uhr – trotz positiver Residuallast (zu viel Verbrauch) – geladen wird. Der Grund dafür ist ein zu niedriger Batterieladezustand. Erst ab 50% wird die Ladeleistung demzufolge reduziert. In den Morgenstunden passt der Controller die Änderung der Ladeleistung stufenweise und variabel entsprechend der Höhe und dem Vorzeichen der HH-Residuallast an und steigert diese sukzessive.

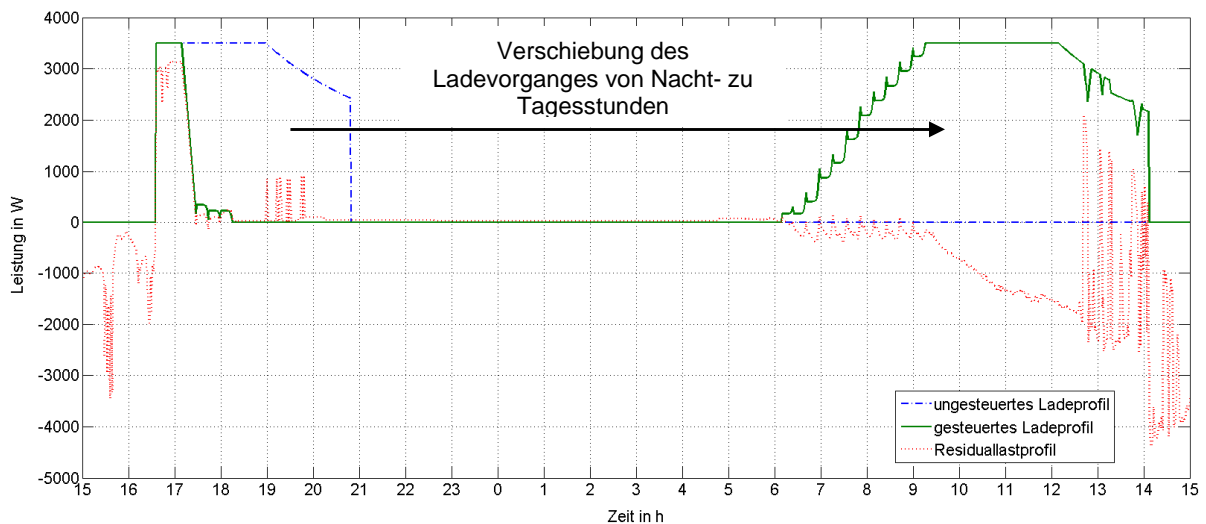


Abbildung 2: DSM-gesteuertes und ungesteuertes Ladeprofil eines beispielhaften rein elektrischen batteriebetriebenen Elektrofahrzeugs (BEV 48 kWh)

4.4 Szenarien

Aufbauend auf den unterschiedlichen Variationsmöglichkeiten der Parameter der Haushaltsgeräte und Elektrofahrzeuge wird ein Ausgangsszenario definiert. Dieses gilt als Grundlage und durch Variation von einzelnen Parametern ergeben sich daraus weitere Szenarien (siehe Tabelle 6).

Tabelle 6: Ausgangsszenario und Variationsmöglichkeiten dessen

	Ausgangsszenario	Variationsmöglichkeiten	
Elektromobilität			
- Durchdringung	hoch (~41%)	gering (~2%)	maximal (~98%)
- Ladestandort	Zuhause	Zuhause + Arbeitsplatz	
- gesteuertes Laden	ja	nein	
DSM			
- gesteuerte Verbraucher	elektro-thermisch ("basic")	elektro-thermisch + waschen + beleuchten ("full")	kein DSM
Geräte/PV			
- Effizienzszzenarien	aktuell	Effizienzsteigerung	
- Geräteausstattung	aktuell	mehr Wärme- und Umwälzpumpen	
- PV Prognose	nein	ja	

Das Ausgangsszenario basiert auf gesteuertes Laden von Elektrofahrzeugen zuhause, wobei eine Durchdringung von 41% angenommen wird. Es werden ausschließlich Geräte der Kategorie „thermisch“ gesteuert. Dabei wird von einer Effizienz und Ausstattung der Geräte auf dem aktuellen Stand ausgegangen. Die PV Ausbau der Modellsiedlung entspricht dem maximal Möglichen. Da Geräte von Typ „waschen“ in ihrem Einsatzzeitpunkt nicht beeinflusst werden, wird keine PV Prognose benötigt.

5 Optimierung

Der in Punkt 4 beschriebene lokale DSM-Ansatz verfolgt das Ziel auf Haushaltsebene den Eigenverbrauch zu erhöhen. Das beschriebene Konzept kann in dieser Form auch praktisch umgesetzt werden. Im Gegensatz dazu kann ein lineares Optimierungsmodell von DSM im Haushalt nicht in einem DSM-Haushaltscontroller implementiert werden. Dies ist darin begründet, dass das Optimierungsmodell die vollständigen Erzeugungs- und Verbrauchszeitreihen benötigt, um das Optimum zu berechnen. Die Kenntnis dieser Zeitreihen entspricht einer „perfekten Prognose“ und ist somit nicht real umsetzbar. Das Ergebnis des Optimierungsmodells stellt somit den theoretischen Grenzwert des maximal erzielbaren Eigenverbrauchs der Haushalte unter den gegebenen Rahmenbedingungen dar. Diese Werte werden in dieser Arbeit als Benchmark betrachtet und den Ergebnissen der tatsächlich erzielten Werte des dezentralen Modellansatzes gegenübergestellt werden.

Der effiziente Einsatz der DSM-Potenziale kann unterschiedliche Ziele verfolgen. Wenn an einem betrachteten Netzknoten (Einzelhaushalt) sowohl ein Einspeiser, ein Verbraucher sowie die PV-Prognoseinformation zur Verfügung stehen, kann lokal entsprechend nach verschiedenen Kriterien, wie Eigenverbrauchsmaximierung oder Reduktion von Leistungsspitzen optimiert werden.

In dieser Arbeit wird nur das Ziel betrachtet, den Eigenverbrauch der Haushalte zu maximieren. Da je Haushalt energetisch sowohl der Verbrauch als auch die Erzeugung fest vorgegeben sind, resultiert diese Zielsetzung in einer Maximierung des Eigenverbrauchsanteils sowie des Autarkiegrades.

$$ZF_{\text{Eigenverbrauch}} = \Delta t \cdot \sum_t P_{EV}(t)$$

6 Ergebnisse

Die Zielsetzung eines möglichst hohen Photovoltaik-Eigenverbrauchs resultiert für jeden Haushalt in einem Energiewert [kWh/a] als Zielfunktionswert. Um dieses Ergebnis zwischen den einzelnen Haushalten besser vergleichen zu können, werden die zuvor beschriebenen Kenngrößen des Eigenverbrauchsanteils und des Autarkiegrades verwendet.

Der Eigenverbrauchsanteil beschreibt den Energiewert des Eigenverbrauchs bezogen auf die Jahreserzeugung der Photovoltaikanlage. Der Autarkiegrad ist der Eigenverbrauch bezogen auf den Jahresstromverbrauch des Haushalts. Somit beschreibt der Eigenverbrauchsanteil (EV) welcher Anteil der Photovoltaikerzeugung direkt im Haushalt verbraucht werden kann und der Autarkiegrad (AG), den Anteil des Haushaltsstromverbrauchs, welcher durch die eigene PV-Anlage gedeckt werden kann.

6.1 Fall – Kein Demand-Side-Management

Abbildung 3 zeigt das Ergebnis der 126 Haushalte als XY-Diagramm für den Fall, dass kein DSM stattfindet („unbeeinflusste Profile“). In der Variante „kein DSM“ wird somit das Erzeugungsprofil der Photovoltaikanlage dem unbeeinflussten Haushaltsstrombedarf und den ungesteuerten Ladeprofilen der Elektro-Fahrzeuge gegenübergestellt. Hieraus wird sowohl der Eigenverbrauchsanteil als auch der Autarkiegrad berechnet. Der gewichtete Mittelwert der Haushalte (126HH) als durchschnittliches Ergebnis innerhalb der Siedlung ist mit einem schwarzen Kreuz gekennzeichnet.

Zusätzlich wird in der Abbildung 3 noch eine Differenzierung bezüglich der Verwendung eines Elektro-Fahrzeuges in den jeweiligen Haushalten durchgeführt. Die blau eingefärbten Punkte zeigen Haushalte, welche über ein E-Fahrzeug verfügen, die rot eingefärbten Haushalte weisen ausschließlich Verbraucher im Haushaltssektor auf. Die Gruppenmittelwerte dieser Haushalte werden ebenfalls in den entsprechenden Farben dargestellt.

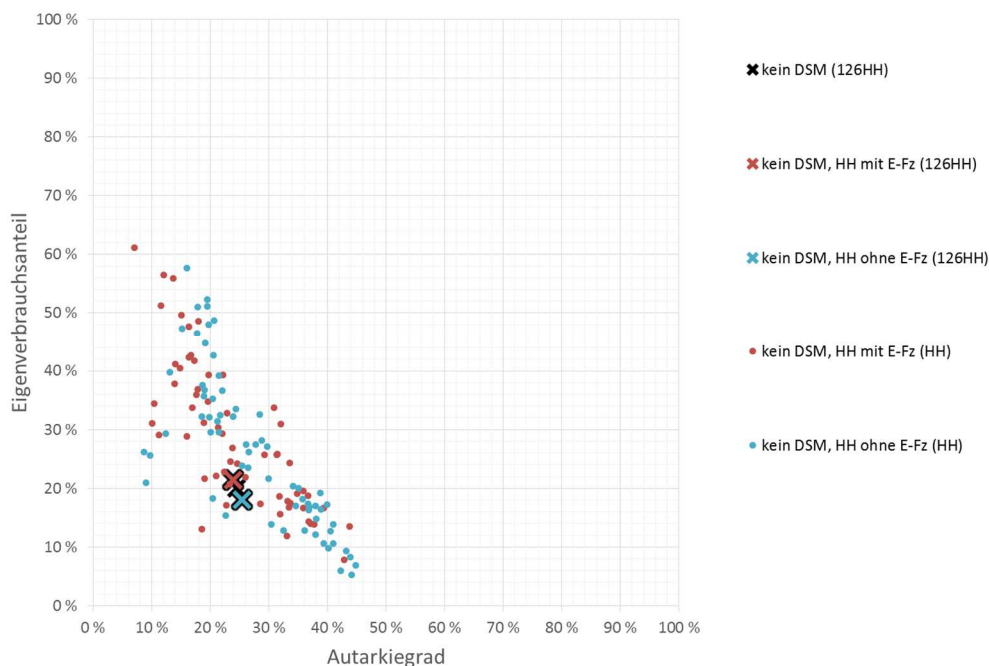


Abbildung 3: Eigenverbrauch der 126 Haushalte für das Szenario "kein DSM" nach der Verwendung von Elektrofahrzeugen

Aus Abbildung 3 kann entnommen werden, dass der Eigenverbrauchsanteil im Bereich zwischen 5% und 61% für die 126 betrachteten Haushalte liegt. Der Autarkiegrad liegt hier im Bereich 7% bis 45%. Es ist zu erkennen, dass die Haushalte mit Elektro-Fahrzeug tendenziell einen leicht höheren Eigenverbrauchsanteil bei einem etwas verringerten Autarkiegrad aufweisen. Dieser Sachverhalt kann jedoch dadurch begründet werden, dass das Elektrofahrzeug einen zusätzlichen Verbraucher darstellt und somit die bezogenen Werte in diese Richtung beeinflussen.

6.2 Fall – Gesteuerte Haushaltsverbraucher und gesteuertes Laden von E-Fahrzeugen

Optimiert man das Ausgangsszenario, in dem neben dem Verbrauchsprofil der elektrothermischen Verbraucher auch das Laden der Elektrofahrzeuge gesteuert wird, steigt der durchschnittliche Eigenverbrauchsanteil von 20% auf 35% sowie der Autarkiegrad von 24% auf 42%. Das Ergebnis wird in Abbildung 4 dargestellt, wobei wieder zwischen Haushalten mit und ohne Elektrofahrzeug optisch unterschieden wird. Haushalte, welche über eine Elektro-Fahrzeug verfügen weisen durchschnittlich sowohl einen höheren Eigenverbrauchsanteil (+15%-Punkte) als auch einen höheren Autarkiegrad (+8%-Punkte) gegenüber den Haushalten ohne Elektro-Fahrzeug auf. Dieses Ergebnis zeigt, dass das gesteuerte Laden von Elektro-Fahrzeugen einen wichtigen Beitrag zum praktisch nutzbaren DSM-Potenzial darstellen kann.

In Abbildung 4 werden dem Diagramm zusätzlich „Kosten-Iso-Linien“ überlagert. Die Linien beschreiben jene Kombinationen aus Autarkiegrad und Eigenverbrauchsanteil, welcher zu den jeweils angegebenen effektiven Haushaltsstromkosten führen. Diese dienen dazu, den idealen Kompromiss zwischen dem angestrebten Eigenverbrauchsanteil und dem Autarkiegrad über dem effektiven Haushaltsstrompreis zu finden. Die effektiven Kosten eines Haushalts K_{HH} in Euro pro Jahr setzen sich dabei aus Strombezugskosten K_B , verringert um die Erlöse aus eingespeisten Photovoltaikleistung K_{PV} sowie den Installationskosten der Photovoltaikanlage I_{PV} zusammen:

$$K_{HH} = K_{Bezug} - K_{PV} + \alpha \cdot I_{PV}$$

Die Stromgestehungskosten der Photovoltaik leiten sich aus den Annahmen von 2000 €/kWp Installationskosten, 30% Investitionsförderung, 1000 Volllaststunden pro Jahr, einer Abschreibedauer von 20 Jahren, sowie einen kalkulatorischen Zinssatz von 4%/a ab. Der Strombezug wird mit 0,20 €/kWh veranschlagt und die Photovoltaikeinspeisung mit 0,07 €/kWh vergütet.

Unter diesen gegebenen Rahmenbedingungen stellt die Linie von 20 C/kWh die Grenze für einen wirtschaftlichen Einsatz einer PV-Anlage dar. All jene Haushalte, welche sich unterhalb dieser Linie befinden weisen höhere effektive Haushaltsstromkosten bei der Installation einer PV-Anlage auf. Daher wäre es für diese Haushalte günstiger, die benötigte elektrische Energie zur Gänze aus dem öffentlichen Netz zu beziehen.

Aus Abbildung 4 ist daher ersichtlich, dass mit Hilfe des gesteuerten Ladens von Elektro-Fahrzeugen der Eigenverbrauch im Haushalt ein deutliches Steigerungspotenzial aufweist. Dies kann zu einer durchschnittlichen Verringerung der effektiven Haushaltsstromkosten um rund 2 C/kWh führen.

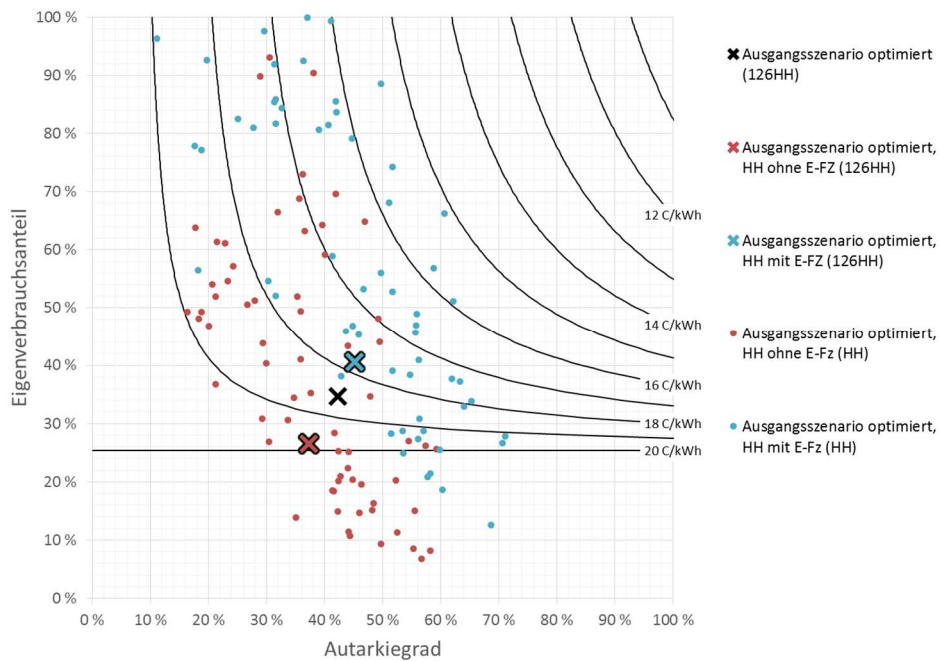


Abbildung 4: Eigenverbrauch für das optimierte Ausgangsszenario nach Verwendung eines Elektrofahrzeugs

Abbildung 5 zeigt die Eigenverbrauchsanteile und Autarkiegrade der 126 Haushalte in Abhängigkeit der PV-Anlagendimensionierung. Wie in der Legende dargestellt, werden die Haushalte entsprechend der Jahreserzeugung im Verhältnis zum Jahresstromverbrauch eingeteilt. Je Gruppe wird wiederum der gewichtete Mittelwert gebildet.

Die Definition von Eigenverbrauchsanteil und Autarkiegrad bewirkt eine exakte Trennung der einzelnen Gruppen durch Geraden, welche vom Nullpunkt ausgehen. So können Haushalte mit einer verhältnismäßig kleinen Photovoltaikanlage deren Erzeugung häufiger zeitgleich verbrauchen. Dadurch erzielen diese Haushalte tendenziell einen höheren Eigenverbrauchsanteil. Gleichzeitig können Anlagen mit einer niedrigeren installierten Leistung nur einen kleineren Anteil des Haushaltsstromverbrauchs decken und der Autarkiegrad ist dementsprechend geringer. Die Anlagendimensionierung legt somit das Verhältnis von Eigenverbrauchsanteil zu Autarkiegrad fest. Maßnahmen des Demand-Side-Managements können über die Variation des Eigenverbrauchs die beiden Kennzahlen gleichermaßen beeinflussen.

Für einzelne Haushalte ist ersichtlich, dass diese durch den Einsatz von DSM in Kombination mit der eigenen Photovoltaikanlage einen effektiven Haushaltsstrompreis von unter 16 C/kWh unter den gegebenen Rahmenbedingungen erzielen können. Im Projekt aDSM werden die Kosten eines DSM-Systems nicht betrachtet. Mit Hilfe des erzielbaren effektiven Haushaltsstrompreises kann jedoch der monetäre Anreiz zur Steigerung des Eigenverbrauchs beziffert werden.

Es ist in Abbildung 5 weiter zu erkennen, dass der gewichtete Mittelwert der Haushalte mit einer Photovoltaikjahreserzeugung von 50% bis 100% des Jahresstromverbrauchs (rot eingefärbt) die besten Ergebnisse im Hinblick auf den effektiven Haushaltsstrompreis erzielen. Die beiden Gruppen „bis 50%“ (blau) und „100% bis 150%“ (grün) erzielen mit 17,5 C/kWh etwas schlechtere Ergebnisse. Für Haushalte deren PV-Anlage etwa das 1,5 bis 3-fache des Jahresstromverbrauchs erzeugt (violett), liegt der Mittelwert genau auf der Grenze der

Wirtschaftlichkeit. Hier kann der Einsatz einer PV-Anlage in Kombination mit DSM den effektiven Haushaltsstrompreis gegenüber dem reinen Netzbezug im Mittel kaum verringern. Anlagen mit einem Erzeugungs-Verbrauchsverhältnis von mehr als dem 3-fachen hingegen erzielen keinen effektiven Haushaltstrompreis, welcher unter 20 C/kWh liegen würde.

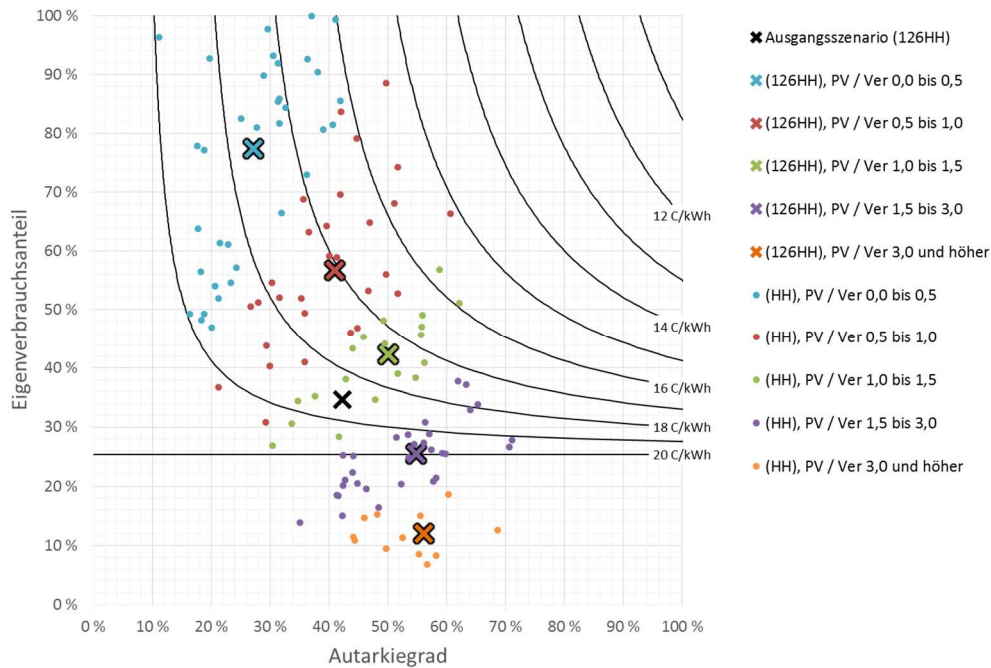


Abbildung 5: Eigenverbrauch für das optimierte Ausgangsszenario in Abhängigkeit der PV-Anlagendimensionierung

6.3 Vergleich lokaler DSM-Ansatz mit der Optimierung

Das Ergebnis des optimierten Einsatzes von elektro-thermischen Verbrauchern und Elektrofahrzeugen der Haushalte hinterlegt eine „perfekte“ Erzeugungs- und Verbrauchsprognose. Dies ist real nicht zu verwirklichen, jedoch sind die Ergebnisse ein Benchmark für die Effizienz des lokalen aDSM-Algorithmus. Der Vergleich der Ergebnisse des Algorithmus mit der Optimierung für das Basisszenario ist in Abbildung 6 dargestellt.

Betrachtet man wieder die gewichteten Mittelwerte aller 126 Haushalte liegt der lokale DSM-Ansatz im Mittel 6%-Punkte beim Eigenverbrauchsanteil und 7%-Punkte beim Autarkiegrad unter der Optimierung. Durch die oben angesprochene Tatsache, dass Wege beim lokalen Modell nicht erfüllt werden können und bei der Optimierung alle Wege erfüllt werden, kann dies bei einzelnen Haushalten mit Elektrofahrzeugen zu einem höheren Autarkiegrad als in der Optimierung führen. In der Regel ist jedoch das Ergebnis der Optimierung sowohl beim Eigenverbrauch als auch beim Autarkiegrad besser als das lokale aDSM Modell.

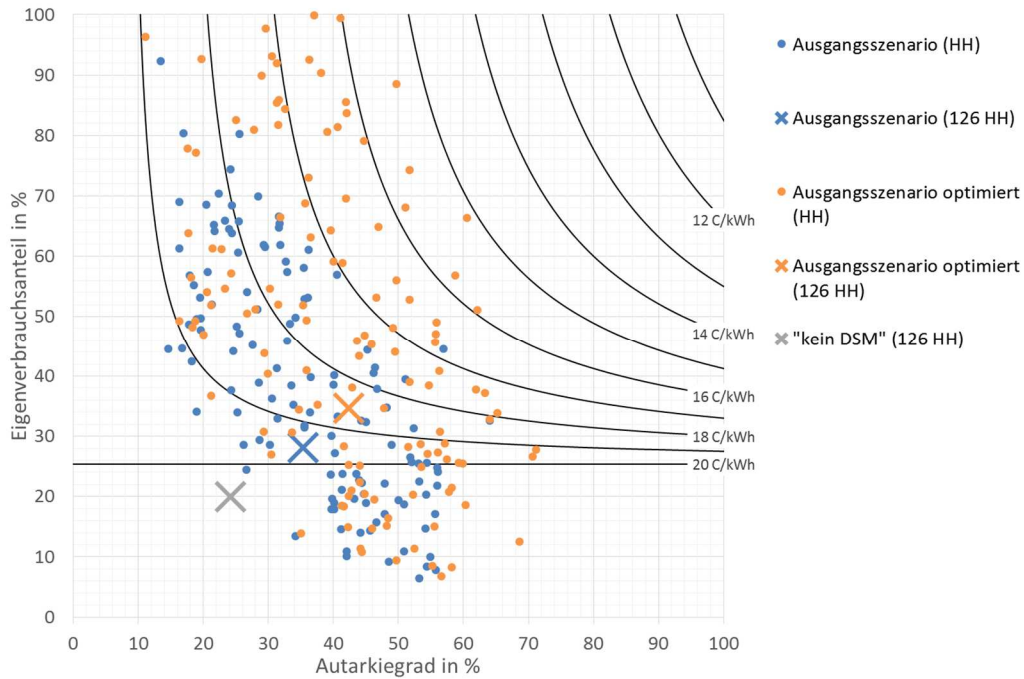


Abbildung 6: Vergleich lokales DSM Modell und Optimierung für das Ausgangsszenario

6.4 Fall – Variante „Full“

Der Effekt, den die zusätzliche Steuerung von Geräten der Kategorie „waschen“ und „beleuchten“ wird beim Vergleich des Ausgangsszenarios mit der Variante „Full“ deutlich. Abbildung 7 zeigt die gewichteten Mittelwerte des Eigenverbrauchanteils und Autarkiegrads der 126 Haushalte für diese Szenarien. Bei Variante „Full+Progn“ wird zusätzlich eine PV-Einspeiseprognose berücksichtigt. Ergänzend wird das Ergebnis des optimierten Ausgangsszenarios und des Falls „kein DSM“ als Benchmark angeführt. Zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit werden wieder die „Kosten-Iso-Linien“ im Diagramm dargestellt.

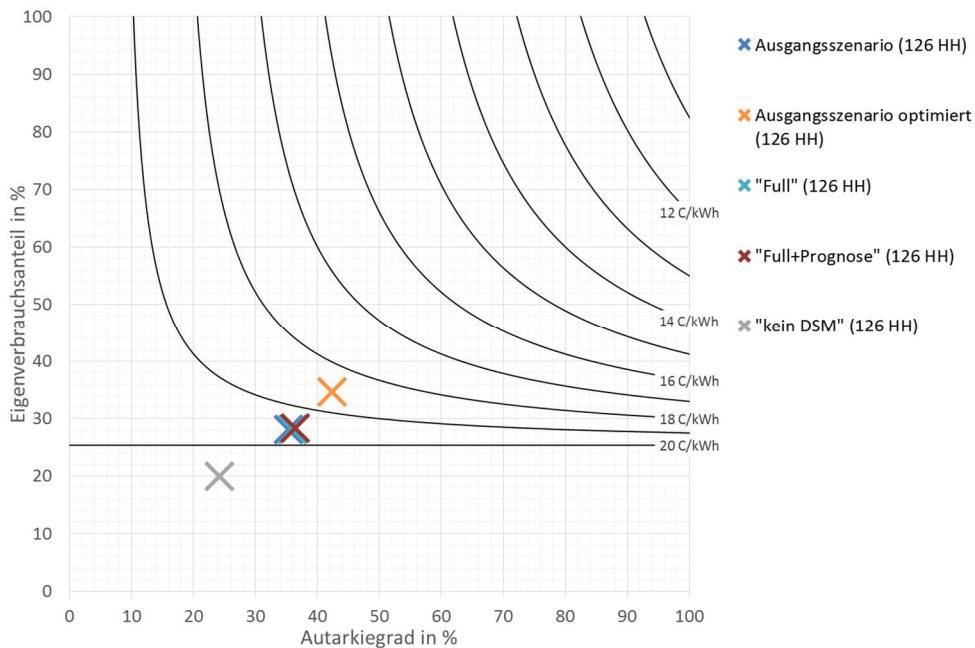


Abbildung 7: Vergleich der DSM-Variante "Full" mit dem Ausgangsszenario

Der Vergleich der Mittelwerte zeigt bestenfalls eine sehr geringe Steigerung des Eigenverbrauchsanteils und des Autarkiegrads durch die Steuerung von programmgesteuerten Geräten und der Beleuchtung. Grund hierfür ist das geringe energetische Verschiebungspotenzial dieser Gerätegruppen gegenüber Elektrofahrzeugen und thermischen Verbrauchern. Merklich ist jedoch die Energieeinsparung, die durch die Standby und Leistungsreduktion der Geräte „beleuchten“ auftritt und in dieser Kategorie 20% aufweist.

Die PV-Einspeiseprognose im Szenario „Full+Progn“ wird ausschließlich für programmgesteuerte Geräte herangezogen, um den Einsatzzeitpunkt zu verbessern. Das Ergebnis weist auch hier mit Mittel keine signifikanten Verbesserungspotenziale für den Eigenverbrauch und den Autarkiegrad auf.

6.5 Weitere Ergebnisse im Überblick

Die Ergebnisse der Variation der in Tabelle 6 angeführten Parameter sind in Tabelle 7 aufgelistet. Neben dem mittleren gewichteten Eigenverbrauchsanteil und dem Autarkiegrad wird auch der mittlere effektive Haushaltsstrompreis, der durch DSM in Verbindung mit PV-Erzeugung zu erzielen ist, angeführt.

Tabelle 7: Zusammenfassung der Ergebnisse

	Eigenverbrauchsanteil	Autarkiegrad	effektiver Haushaltsstrompreis
	%	%	€/kWh
Ausgangsszenario	28%	35%	0,195
kein DSM	20%	24%	0,209
"Full"	28%	36%	0,195
"Full + Prognose"	28%	36%	0,195
max. E-Fz Durchdringung	36%	31%	0,188
geringe E-Fz Durchdringung	24%	37%	0,204
nur E-Fz gesteuert	25%	31%	0,201
nur "elektro-thermisch"	26%	32%	0,199
Effizienzsteigerung	25%	37%	0,201
veränderte Geräteausstattung	44%	18%	0,190
E-Fz Laden auch am Arbeitsplatz	28%	36%	0,196
Ausgangsszenario optimiert	35%	42%	0,185

Durch die Variation der Elektrofahrzeugdurchdringung (gering, sehr hoch) kann das lokale DSM-Modell einen mittleren Eigenverbrauchsanteil der Haushalte zwischen 24% und 36% erzielen. Dies entspricht einem effektiven Haushaltsstrompreis von 0,204 €/kWh bis 0,188 €/kWh.

Das reine gesteuerte Laden von Elektrofahrzeugen steigert den Eigenverbrauchsanteil um 5%-Punkte und den Autarkiegrad um 7%-Punkte gegenüber dem ungesteuerten Fall. Werden nur Geräte der Kategorie „elektro-thermisch“ gesteuert, erhöht sich der Eigenverbrauchsanteil um 6%-Punkte bzw. der Autarkiegrad um 8%-Punkte. Stellt man diese Erhöhung dem Ausgangsszenario gegenüber, bei dem beide Verbraucherkategorien gleichzeitig gesteuert werden, sieht man, dass dieser Wert geringer ist als die Summe der beiden Eigenverbrauchsteigerungen. Es zeigt sich aber, dass weder die elektro-thermischen Verbraucher noch die Ladevorgänge der Elektrofahrzeuge alleine das verfügbare DSM-Potenzial ausschöpfen können. Aus technischer Sicht ist somit die kombinierte Steuerung der beiden Verbrauchergruppen sinnvoll.

Geht man von einer Effizienzsteigerung der Haushaltsgeräte in Zukunft aus, sinkt die Wirtschaftlichkeit von DSM im Vergleich zum Ausgangsszenario, wodurch es vermehrt in Haushalten mit Elektrofahrzeugen Sinn machen würde.

Bei einer zusätzlichen Zunahme des Ausstattungsgrades der Wärmepumpen, der Umwälzpumpen und der elektrischen Warmwasseraufbereitung in der Kategorie „Haus“ (siehe [1]) steigt die gesamte elektrische Energienachfrage in der aDSM Siedlung um 210%. Folglich kann die PV-Erzeugung der Haushalte vermehrt selbst verbraucht werden, was zu einer Steigerung des Eigenverbrauchsanteils auf Siedlungsbasis auf 45% führt. Der Autarkiegrad nimmt dabei merklich auf 18% im Mittel ab. Wirtschaftlich gesehen kann DSM in diesem Fall die effektiven Strombezugskosten senken, was bei erhöhtem Stromverbrauch den finanziellen Anreiz für einen Einsatz von DSM erhöht.

Durch die Berücksichtigung einer Lademöglichkeit der Elektrofahrzeuge am Arbeitsplatz erhöht sich die Erfüllbarkeit der Wegstrecken um 1%-Punkt. Der Energiebedarf der Elektrofahrzeuge sinkt dabei im Mittel um 19%, da dieser in der Arbeit konsumiert wird. Die Auswirkungen auf den Eigenverbrauchsanteil und Autarkiegrad sind dennoch vernachlässigbar.

Die Unterschiede des zu erzielenden Eigenverbrauchs entsprechend der Haushalts-Merkmale „Stadt / Land“, „Heizungssystem“, „Gebäudetyp“ und „Anzahl an Personen pro Haushalt“ können, sofern vorhanden, praktisch ausschließlich durch das zugrundeliegende Merkmal „PV-Anlagen-Dimensionierung“ erklärt werden, mit dem ein starker Zusammenhang besteht. Ebenso konnte zwischen den unterschiedlichen PV-Anlagenausrichtungen (Ost/West-Dach bzw. Süd-Dach) kein signifikanter Unterschied im Eigenverbrauchsanteil bzw. Autarkiegrad gefunden werden.

7 Schlussfolgerungen

Der Einsatz eines DSM-Systems, welches elektro-thermische Verbraucher im Haushalt sowie den Ladevorgang von Elektro-Fahrzeugen beeinflusst, weist einen positiven Effekt auf die Steigerung des Photovoltaik-Eigenverbrauchs der Haushalte auf. Durchschnittlich kann der Eigenverbrauchsanteil durch den lokalen DSM-Ansatz von 20% auf 28% sowie der Autarkiegrad von 24% auf 35% im Vergleich zu den unbeeinflussten Verbrauchsprofilen gesteigert werden. Bei „perfekter“ Last- und Erzeugungsprognose kann ein optimaler Wert von 35% beim Eigenverbrauchsanteil und 43% beim Autarkiegrad erzielt werden.

In der Steigerung des Eigenverbrauchs besteht ein wirtschaftlicher Anreiz zur Umsetzung eines derartigen Systems. Dieser ist in der derzeitigen Kostenstruktur für private Haushalte zu suchen. Jene Erzeugung der eigenen Photovoltaikanlage, welche direkt verbraucht werden kann, verringert den notwendigen Strombezug aus dem öffentlichen Netz. Da dieser Bezugspreis höher ist, als die Einspeisevergütung von Photovoltaikerzeugung, sind private Haushalte an einem möglichst hohen Eigenverbrauch interessiert. Für einzelne Haushalte ergibt sich dadurch eine Reduktion des effektiven Haushaltsstrompreises um bis zu 3 C/kWh.

Die Ergebnisse bezüglich des zu erzielenden Eigenverbrauchsanteils und des Autarkiegrades, welche in weiterer Folge die Wirtschaftlichkeit bestimmen, hängen stark von der Dimensionierung der Photovoltaikanlage ab. Das Verhältnis von Jahreserzeugung zu Jahresverbrauch bestimmt direkt das Verhältnis von Autarkiegrad zu Eigenverbrauchsanteil.

Unter den angenommenen, derzeitigen Rahmenbedingungen zeigen sich die besten wirtschaftlichen Ergebnisse für Haushalte deren PV-Jahreserzeugung in etwa dem Jahresstromverbrauch entspricht oder knapp darunter liegt.

Einen weiteren entscheidenden Einflussfaktor auf den PV-Eigenverbrauch stellt der Besitz eines Elektrofahrzeuges dar und die damit verbundene Möglichkeit des gesteuerten Ladens. Jene Haushalte, welche über ein Elektrofahrzeug verfügen weisen durchschnittlich sowohl einen höheren Eigenverbrauchsanteil als auch einen höheren Autarkiegrad gegenüber den Haushalten ohne Elektrofahrzeug auf. Dieses Ergebnis zeigt, dass das gesteuerte Laden von Elektrofahrzeugen einen wichtigen Beitrag zum praktisch nutzbaren DSM-Potenzial darstellt.

Als Faktoren mit geringem Einfluss haben sich hingegen die zusätzliche Steuerung von Verbrauchern der Kategorie „waschen“ und „beleuchten“ und die Berücksichtigung einer PV-Prognose herausgestellt.

8 Literatur

- [1] C. Groiß, DSM-Potenziale in einer österreichischen Modellsiedlung, *8. Internationale Energiewirtschaftstagung an der TU Wien*, Wien, 2013.
- [2] R. Haas und M. Kloess, Elektra - Entwicklung von Szenarien der Verbreitung von Pkw mit teil- und vollelektrifiziertem Antriebsstrang unter verschiedenen politischen Rahmenbedingungen, A3plus - Austrian Advanced Automotive Technology, *Endbericht*, Wien, 2009.
- [3] TU Wien, ESEA, „Super-4-Micro-Grid,“, *Projektendbericht*, Wien, 2011.
- [4] Statistik Austria, „Österreichs Städte in Zahlen,“ 2011 .
- [5] M. Lödl, „Abschätzung des Photovoltaik-Potentials auf Dachflächen in Deutschland,“ in *11. Symposium Energieinnovation*, Graz, 2010.
- [6] R. Schlager, „Möglichkeiten und Anforderungen an Speichertechnologien im Verteilnetz bei einem starken Ausbau dezentraler Erzeugungseinheiten,“ in *8. Internationale Energiewirtschaftstagung an der TU Wien*, Wien, 2013.
- [7] H. Fechner, „Gebäudeintegrierte Photovoltaik Teil 2. s.l.,“ in *Österreichischer Klima- und Energiefonds*, 2009.

Das Projekt „aDSM“ wird aus den Mitteln des Klima- und Energiefonds gefördert und im Rahmen des Programms „NEUE ENERGIEN 2020“ durchgeführt.

